

Оригінальна стаття

<https://doi.org/10.26565/2311-0872-2020-32-08>

УДК 537.876.23:537.877

ПРО АНОМАЛЬНЕ ПОГЛИНАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ СУБХВИЛЬОВИМ МЕТАЛЕВИМ ДРОТОМ

М.Г. Кокодій, В.О. Маслов, К.І. Мунтян

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи 4, м. Харків, 61022, Україна

E-mail: v.a.maslov@karazin.ua

Надійшла до редакції 30 вересня 2020 р.

Актуальність. Розглянуто ефект аномально сильного поглинання, розсіювання і ослаблення мікрохвильового електромагнітного випромінювання тонкими провідними дротами. Досліджуваний ефект може знайти застосування при розробці матеріалів, що поглинають радіовипромінювання та маскують об'єкти від радіолокаційного виявлення.

Мета роботи – з'ясування фізичної природи ефекту.

Матеріали та методи. На підставі узагальненої теорії Лоренца-Мі побудована математична модель дифракційної взаємодії мікрохвильового випромінювання з циліндричним об'єктом, матеріал якого характеризується комплексним показником заломлення. Розглянуто випадок нормального падіння плоскої електромагнітної хвилі E - і H -поляризацій на циліндр. Чисельні розрахунки розподілу полів виконані в середовищі MathCard.

Результати. Показано, що для товстих циліндрів, діаметр яких більше довжини хвилі, спостерігаються характерні резонансні піки поглинання і розсіювання енергії хвилі. Для дуже тонких циліндрів, діаметр яких значно менше довжини хвилі, спостерігаються максимуми поглинання і розсіювання енергії падаючого випромінювання, які не можна пояснити резонансними явищами. Отримано спрощені аналітичні вирази для коефіцієнтів ефективності ослаблення, поглинання і розсіювання електромагнітного випромінювання тонкими циліндрами. Розраховані розподіли полів всередині і зовні діелектричного і металевого циліндрів при різних співвідношеннях їх діаметра і довжини хвилі падаючого випромінювання. Досліджено ефективність поглинання випромінювання при різних співвідношеннях діаметра дрота і товщини скін-шару.

Висновки. З'ясовано, що ефект аномально сильного поглинання мікрохвильового випромінювання дуже тонкими металевими дротами обумовлений існуванням скін-ефекту для провідних матеріалів, що взаємодіють з мікрохвильовим випромінюванням. Отримано, що максимальна ефективність поглинання випромінювання досягається в тому випадку, коли діаметр дрота в два рази менше товщини скін-шару. Спостережуваний ефект аномального поглинання носить нерезонансний характер.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: мікрохвилі, дифракція, тонкий дріт, поглинання, фактор ефективності.

ON ANOMALOUS ABSORPTION OF ELECTROMAGNETIC RADIATION BY A SUBWAVE METAL WIRE

N. G. Kokodii, V. A. Maslov, K.I. Muntean

V. N. Karazin Kharkiv National University, 4, Svobody Square, Kharkiv, 61022, Ukraine

Background: The effect of anomalously strong absorption, scattering and attenuation of microwave electromagnetic radiation by thin conductive wires is considered. The investigated effect can be used in the development of radio-absorbing and radio-masking materials for various purposes.

The aim of the work is to clarify the physical nature of the effect.

Materials and methods: On the basis of the generalized Lorentz-Mi theory the mathematical model of diffraction interaction of microwave radiation with a cylindrical object which material is characterized by a complex refractive index is constructed. The case of normal incidence of a plane electromagnetic wave of E - and H -polarizations on a cylinder is considered. Numerical calculations of the field distribution were performed in the MathCard environment.

Results: It is shown that for thick cylinders with a diameter greater than the wavelength, characteristic resonant peaks of absorption and scattering of wave energy are observed. For very thin cylinders, the diameter of which is much smaller than the wavelength, there are maxima of absorption and scattering of energy of incident radiation, which cannot be explained by resonant phenomena. Simplified analytical expressions for the efficiency coefficients of attenuation, absorption and scattering of electromagnetic radiation by thin cylinders are obtained. The field distributions inside and outside the dielectric and metal cylinders at different ratios of their diameter and wavelength of incident radiation are calculated. The efficiency of radiation absorption by a thin wire at different ratios of its diameter and skin-layer thickness for wire material has been studied.

Conclusion: It was found that the effect of abnormally strong absorption of microwave radiation by very thin metal wires is due to the existence of a skin effect for conductive materials that interact with microwave radiation. It is obtained that the maximum efficiency of radiation absorption is achieved when the diameter of the wire is twice less than the thickness of the skin layer. The observed effect of anomalous absorption is nonresonant.

KEYWORDS: microwaves, diffraction, thin wire, absorption, efficiency factor.

ОБ АНОМАЛЬНОМ ПОГЛОЩЕНИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СУБВОЛНОВОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПРОВОЛОКОЙ

Н.Г. Кокодій, В.А. Маслов, К.И. Мунтян

Харьковский национальный университет имени В. Н. Каразина, пл. Свободы, 4, г. Харьков, 61022, Украина

Актуальность. Рассмотрен эффект аномально сильного поглощения, рассеивания и ослабления микроволнового электромагнитного излучения тонкими проводящими проволоками. Исследуемый эффект может найти применение при разработке радиопоглощающих и радиомаскирующих материалов различного назначения.

Цель работы – выяснение физической природы эффекта.

Материалы и методы. На основании обобщенной теории Лоренца-Ми построена математическая модель дифракционного взаимодействия микроволнового излучения с цилиндрическим объектом, материал которого характеризуется комплексным показателем преломления. Рассмотрен случай нормального падения плоской электромагнитной волны E- и H-поляризации на цилиндр. Численные расчеты распределения полей выполнены в среде MathCard.

Результаты. Показано, что для толстых цилиндров, диаметр которых больше длины волны, наблюдаются характерные резонансные пики поглощения и рассеяния энергии волны. Для очень тонких цилиндров, диаметр которых значительно меньше длины волны, наблюдаются максимумы поглощения и рассеяния энергии падающего излучения, которые нельзя объяснить резонансными явлениями. Получены упрощенные аналитические выражения для коэффициентов эффективности ослабления, поглощения и рассеяния электромагнитного излучения тонкими цилиндрами. Рассчитаны распределения полей внутри и снаружи диэлектрического и металлического цилиндров при различных соотношениях их диаметра и длины волны падающего излучения. Исследована эффективность поглощения излучения при различных соотношениях диаметра проволоки и толщины скин-слоя.

Выводы. Выяснено, что эффект аномально сильного поглощения микроволнового излучения очень тонкими металлическими проволоками обусловлен существованием скин-эффекта для проводящих материалов, взаимодействующих с микроволновым излучением. Получено, что максимальная эффективность поглощения излучения достигается в том случае, когда диаметр проволоки в два раза меньше толщины скин-слоя. Наблюдаемый эффект аномального поглощения носит нерезонансный характер.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: микроволны, дифракция, тонкий провод, поглощение, фактор эффективности.

ВСТУП

Проблема дифракції електромагнітного випромінювання на циліндричних об'єктах є однією з найвідоміших в електродинаміці. Це пов'язано з безліччю її наукових та практичних застосувань. Аналіз дифракційної картини дозволяє отримати інформацію про розмір перерізу циліндра, його форму та показник заломлення речовини, з якої він складається. Численні методи вимірювання цих параметрів описані в різних статтях та монографіях [1-3].

Дифракційна взаємодія залежить від співвідношення між довжиною хвилі випромінювання λ та діаметром циліндра D . Для деяких значень D/λ виникають резонанси, тоді розсіювання та поглинання збільшуються. У [4] наведено результати розрахунків залежності коефіцієнта ефективності розсіювання Q_{sca} для товстого заломлюючого циліндра ($D/\lambda \gg 1$) від параметра $\rho = \pi D/\lambda$ при нормальному падінні хвилі (хвильовий вектор перпендикулярний осі циліндра).

Математичний аналіз резонансних явищ у товстих заломлюючих циліндрах проведено в [5-7]. Взаємодія хвилі з об'єктом (розсіювання та поглинання) є найпотужнішою, коли його розміри порівнянні з довжиною хвилі. Невеликі предмети, розташовані на шляху поширення хвилі, хвиля зазвичай "не помічає". Але в роботах [8, 9] описано ефект сильного поглинання електромагнітного випромінювання в дуже тонких провідних циліндрах (металевих дротах і графітових волокнах), коли електричний вектор хвилі паралельний осі дроту. У роботі [8] було описано експеримент, в якому близько 10% енергії падаючого пучка випромінювання з довжиною хвилі 3 см поглиналося в платиновому дроті діаметром 20 мкм. Діаметр пучка становив 2 см, тобто в 1000 разів більший діаметра дроту. Промінь не сфокусований.

Ефект сильної взаємодії електромагнітної хвилі з дуже тонкими проводами також теоретично розглядався в [10-13]. У той же час в [12] теоретично було показано, що цей ефект також існує, якщо провід розташований вздовж осі пучка випромінювання.

Усі ці роботи не пояснюють фізичної природи ефекту – чому дуже тонкі провідні волокна сильно поглинають і розсіюють електромагнітне випромінювання.

Дана проблема розглядається в цій роботі.

ТЕОРЕТИЧНІ СПІВВІДНОШЕННЯ

Значення коефіцієнтів ефективності розсіювання Q_{sca} , поглинання Q_{abs} і ослаблення Q для випадку нормального падіння хвилі на циліндр можна розрахувати за формулами [1, 2]:

$$Q^E = \frac{2}{\rho} \sum_{l=-\infty}^{\infty} \operatorname{Re}(b_l) , \quad Q_{sca}^E = \frac{2}{\rho} \sum_{l=-\infty}^{\infty} |b_l|^2 \quad - \text{ для } E\text{-хвилі,} \quad (1)$$

$$Q^H = \frac{2}{\rho} \sum_{l=-\infty}^{\infty} \operatorname{Re}(a_l) , \quad Q_{sca}^H = \frac{2}{\rho} \sum_{l=-\infty}^{\infty} |a_l|^2 \quad - \text{ для } H\text{-хвилі,} \quad (2)$$

$$Q_{abs}^E = Q^E - Q_{sca}^E , \quad Q_{abs}^H = Q^H - Q_{sca}^H \quad (3)$$

$$b_l = \frac{m J_l'(m\rho) J_l(\rho) - J_l(m\rho) J_l'(\rho)}{m J_l'(m\rho) H_l^{(2)}(\rho) - J_l(m\rho) H_l^{(2)'}(\rho)} , \quad (4)$$

$$a_l = \frac{m J_l(m\rho) J_l'(\rho) - J_l'(m\rho) J_l(\rho)}{m J_l(m\rho) H_l^{(2)}(\rho) - J_l'(m\rho) H_l^{(2)'}(\rho)} , \quad (5)$$

де $J_l(z)$ — функції Бесселя, $H_l^{(2)}(z)$ — функції Ганкеля другого роду. Знак « ' » означає диференціювання функції по всьому аргументу, $m = n - ik$ — комплексний показник заломлення. Індeksi E і H відповідають двом типам поляризації хвилі: E -поляризації, коли електричний вектор хвилі паралельний осі циліндра, і H -поляризації, коли магнітний вектор хвилі паралельний осі циліндра.

На Рис. 1а представлений графік залежності коефіцієнта корисної дії (ККД) розсіювання хвиль діелектричним циліндром від його діаметра. Показник заломлення циліндра $n = 1,5$. Добре видно резонансні піки, розташовані на відстані $\Delta\rho = 0,75$ один від одного. Це добре описується формулою:

$$\Delta\rho = \frac{\arctg \sqrt{n^2 - 1}}{\sqrt{n^2 - 1}} , \quad (6)$$

де n — показник заломлення циліндра.

На Рис. 1б представлений графік залежності ККД поглинання $Q_{abs}(\rho)$ від значення комплексного показника заломлення циліндра $m = 1,5 - 0,001i$, на якому також присутні характерні резонансні піки. Особливо відзначимо, що значення параметра ρ для резонансів розсіювання і поглинання на Рис. 1а і 1б збігаються.

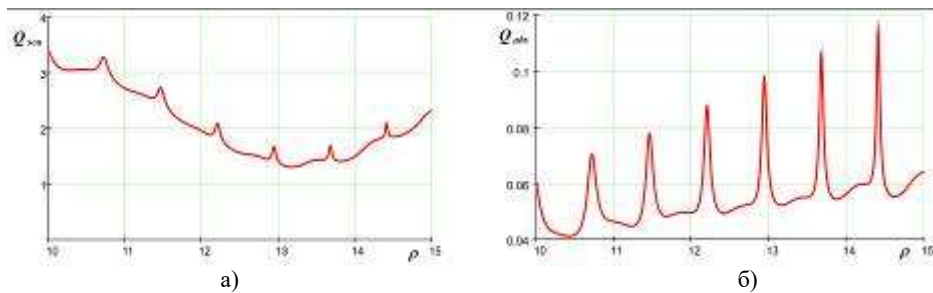


Рис. 1. Резонанси розсіяння (а) та поглинання (б) хвилі в циліндрі.

На Рис. 2 представлені графіки залежності коефіцієнта ефективності поглинання платиного дроту від його діаметра для кількох довжин хвиль для E -поляризації, які розраховані за формулами (2) – (6). При деяких відносинах D/λ спостерігається максимум поглинання. При $\lambda = 8$ мм в максимумі $Q_{abs} = 962$, при $\lambda = 10$ см $Q_{abs} = 2615$, при $\lambda = 1$ м $Q_{abs} = 7928$. Максимум досягається при дуже малих діаметрах дроту. Це 4,1 мкм на довжині хвилі 1 м, 1,5 мкм на довжині хвилі 10 см, 0,3 мкм на довжині хвилі 8 мм.

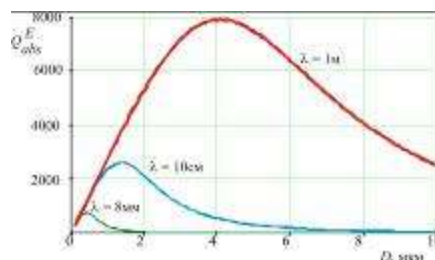


Рис. 2. Залежності коефіцієнта ефективності поглинання платиного дроту від його діаметра

У розрахунках комплексний показник заломлення визначався виразом

$$m = \sqrt{\frac{\sigma}{2\omega\epsilon_0}}(1 - i), \quad (7)$$

де σ - провідність, ω - кругова частота, ϵ_0 - діелектрична проникність вільного простору.

ПОГЛИНАННЯ ВИПРОМІНЮВАННЯ В ТОНКОМУ ДРОТІ. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

З вищевикладеного випливає, що зростання ефективності поглинання випромінювання субхвильовими дротами не може бути пояснено резонансними явищами. Дійсно, на Рис. 3 показані графіки коефіцієнтів ефективності ослаблення Q , поглинання Q_{abs} і розсіювання Q_{sca} для платиного дроту на довжині хвилі 10 см. По осі абсцис відкладені значення добутку $n\rho = \pi D/\lambda_i$, де $\lambda_i = \lambda/n$ — довжина хвилі випромінювання всередині циліндра. Максимуми графіків знаходяться в різних місцях по осі абсцис. Це говорить про те, що їх положення визначається не умовами резонансу - певним співвідношенням діаметра циліндра і довжини хвилі, як, наприклад, в резонансах, показаних на Рис. 1, де положення максимумів поглинання і розсіювання збігаються.

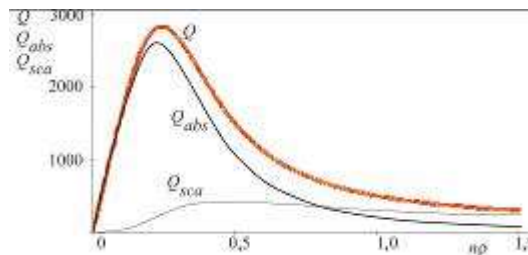


Рис. 3. Залежності коефіцієнтів поглинання, розсіювання та ослаблення випромінювання тонким дротом від добутку $n\rho$

Діаметр циліндра при максимальному поглинанні менше довжини хвилі як у вільному просторі, так і всередині нього, так що навіть одна півхвиля значно більше характерного розміру циліндра (діаметра або довжини окружності), і умови резонансу не можуть бути дотримані.

Чисельні розрахунки поглинання електромагнітного випромінювання в тонкому дроті дозволяють встановити деякі закономірності цього процесу.

Для випромінювання з довжиною хвилі більше 100 мкм, де добре працює теорія Друде, виконується наближене співвідношення

$$n\rho \approx 0,275 \quad (8)$$

або

$$D/\lambda_i \approx 0,1. \quad (9)$$

Таким чином, нерезонансність ефекту підтверджується наступними фактами.

1) Положення максимумів на графіках залежності коефіцієнтів ефективності ослаблення Q , поглинання Q_{abs} і розсіювання Q_{sca} від параметра ρ не збігаються (Рис.3), а на графіках для товстих циліндрів такі максимуми розташовані при однакових значеннях ρ — в місцях, визначених умовами резонансу в циліндрі (Рис. 1).

2) Співвідношення (8) і (9) показують, що максимум поглинання виникає, коли довжина хвилі всередині циліндра приблизно в 10 разів більше діаметру циліндра. Очевидно, що в таких умовах не може виникнути резонансу. При резонансі одна або кілька півхвиль випромінювання повинні накладатися на характерний розмір об'єкта.

Розрахунки показали, що залежність поглинання в максимумі від довжини хвилі добре описується формулою

$$Q_{abs \max} \approx \frac{1}{4} \sqrt{\frac{\sigma\lambda}{\pi c \epsilon_0}}, \quad (10)$$

де σ - провідність, λ - довжина хвилі випромінювання у вільному просторі, c - швидкість світла у вільному просторі, ϵ_0 - діелектрична проникність вільного простору.

КОЕФІЦІЄНТ ЕФЕКТИВНОСТІ ОСЛАБЛЕННЯ ДЛЯ ТОНКОГО ПРОВІДНОГО ЦИЛІНДРА

Розглянемо особливості взаємодії електромагнітної хвилі з тонким циліндром, який проводить. Умова $D \ll \lambda$ виконується, тому $\rho = \pi D/\lambda \ll 1$. Поглинання циліндром визначається комплексним показником заломлення $m = n - ik$. Для циліндрів, які добре проводять, цей показник описується

формулою (7). У цій формулі $n \gg 1$ і $k \gg 1$, але для тонкого дроту $|m\rho| \ll 1$. Хвиля падає перпендикулярно осі циліндра. Розглянемо Е-хвилю, для якої наявний значний ефект поглинання.

Для дуже тонких циліндрів ($\rho \ll 1$, $|m\rho| \ll 1$) ми можемо обмежити ряди (1) - (3) тільки першим членом. Обмежимо також першим членом коефіцієнти b_l розкладання в ряди функцій Бесселя і Ганкеля.

З графіків Рис. 3 видно, що положення максимумів поглинання і ослаблення близькі один до одного. Тому ми будемо аналізувати коефіцієнт ефективності ослаблення Q_{abs} , який описується більш простою формулою.

Для малих аргументів функції Бесселя $J_n(z)$ і Неймана $N_n(z)$ і їх похідні можуть бути визначені наступним чином:

$$\begin{aligned} J_0 &\approx 1 - \frac{z^2}{4}, & J'_0 &\approx -\frac{z}{2}, \\ N_0(z) &\approx -\frac{2}{\pi} \ln \frac{2}{qz}, & N'_0(z) &\approx \frac{2}{\pi z}. \end{aligned} \quad (11)$$

де $q = e^\gamma = 1,781$, $\gamma = 0,5772 \dots$ - постійна Ейлера.

Вираз (5) для коефіцієнта b_l можна записати в наступному вигляді:

$$b_l = \frac{1}{1 - i \frac{B_l}{A_l}}, \quad (12)$$

де

$$\begin{aligned} A_l &= m J'_l(m\rho) J_l(\rho) - J_l(m\rho) J'_l(\rho) \\ B_l &= m J'_l(m\rho) N_l(\rho) - J_l(m\rho) N'_l(\rho) \end{aligned}$$

Перший член ряду визначається підстановкою (11) в ці вирази:

$$A_0 = -\frac{(m^2 - 1)\rho}{2}, \quad B_0 = \frac{m^2 \rho}{2\pi} \left(1 + 2 \ln \frac{2}{q\rho} \right) - \frac{2}{\pi\rho}.$$

Підставляючи ці вирази в (12), отримуємо:

$$b_0 = \frac{1}{1 - i \left[\frac{4}{\pi\rho^2(m^2 - 1)} - \frac{m^2}{\pi(m^2 - 1)} \left(1 + 2 \ln \frac{2}{q\rho} \right) \right]}.$$

Зробимо кілька спрощень цієї формули. Оскільки $|m| \gg 1$, тоді $m^2 - 1 \approx m^2$ і $m^2 / (m^2 - 1) \approx 1$. Оскільки $\rho \ll 1$, то $2 \ln(2/q\rho) \gg 1$ і $1 + 2 \ln(2/q\rho) \approx 2 \ln(2/q\rho)$. Значення $2/q = 1,123$. Це близько до 1, тому $\ln(2/q\rho) \approx -\ln \rho$.

Отже, отримуємо:

$$b_0 = \frac{1}{1 - \frac{2i}{\pi} \left(\ln \rho + \frac{2}{m^2 \rho^2} \right)}. \quad (13)$$

Оскільки $m = n(1 - i)$, то $m^2 = -2in^2$, і формула (13) прийме наступний вигляд:

$$b_0 = \frac{1}{\left(1 + \frac{2}{\pi n^2 \rho^2} \right) - i \frac{2 \ln \rho}{\pi}}. \quad (14)$$

Коефіцієнт ефективності ослаблення визначається за формулою (14) наступним чином:

$$Q = \frac{2}{\rho} \operatorname{Re}(b_0). \quad (15)$$

Таким чином, необхідно знайти дійсну частину виразу (14) і підставити її в формулу (15).

У формулі (14) обидва члени знаменника по модулю є величинами одного порядку. Жодним із них не можна нехтувати. Отже, вони обидва повинні міститися в формулі:

$$Q = \frac{2}{\rho} \frac{1 + \frac{2}{\pi n^2 \rho^2}}{\left(1 + \frac{2}{\pi n^2 \rho^2} \right)^2 + \left(\frac{2 \ln \rho}{\pi} \right)^2}.$$

Ми можемо спростити вираз, нехтуючи одиницями:

$$Q = \frac{\pi n^2 \rho}{1 + (n^2 \rho^2 \ln \rho)^2} . \quad (16)$$

Залежність коефіцієнта ефективності ослаблення від параметра $n\rho$, розрахована за точними формулами (жирна лінія) і за формулою (16) (тонка лінія), показана на Рис. 4. Видно, що наближена формула (16) добре описує хід кривої $Q(n\rho)$ і положення максимуму.

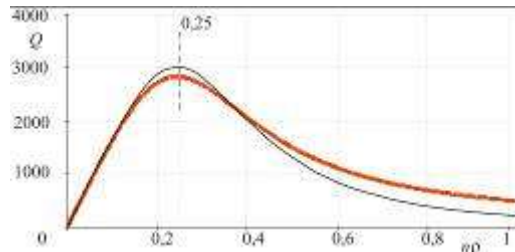


Рис. 4. Послаблення випромінювання тонким платиновим дротом

Тепер визначимо положення і амплітуду максимуму. З формули (16) видно, що хід кривої в основному визначається величиною $n\rho$. Величина $\ln(\rho)$ змінюється набагато повільніше. Отже, ми визначаємо стан мінімуму знаменника шляхом диференціювання по n і вважаючи $\ln(\rho) = \text{const}$. Для умови максимуму ККД ослаблення і близького до нього максимуму ККД поглинання виходить таке значення:

$$n\rho = \frac{2}{\sqrt[3]{2(\ln \rho)^2}} . \quad (17)$$

Положення максимуму в основному визначається співвідношенням довжини хвилі і розміру циліндра, але це співвідношення не є постійним, як при звичайному резонансі, а залежить, хоча і слабо, від параметра ρ .

Таким чином, аналіз підтверджує нерезонансний характер ефекту великого поглинання випромінювання в дуже тонкому циліндрі.

На Рис. 5 показано положення максимуму щодо параметра ρ . Ця залежність слабка, і наближені співвідношення можна записати аналогічно співвідношенням (8) і (9), отриманим чисельним аналізом ефекту:

$$n\rho \approx 0,25, \quad (18)$$

$$\frac{\pi D}{\lambda_i} \approx 0,08 . \quad (19)$$

Вони узгоджуються з наведеними в формулах (8) і (9).

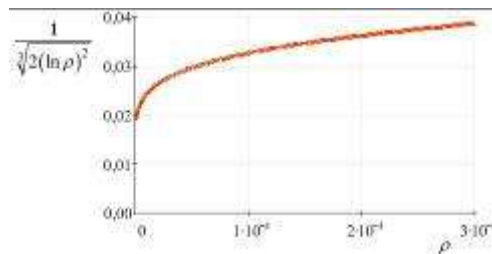


Рис. 5. Положення максимального ослаблення випромінювання тонким дротом

Максимальне поглинання можна знайти, підставивши вираз (17) в (16). З огляду на то, що в цьому випадку

$$n = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\sigma \lambda}{\pi c \epsilon_0}} ,$$

ми отримуємо

$$Q_{\max} \approx 0,6n = 0,3 \sqrt{\frac{\sigma \lambda}{\pi c \epsilon_0}} . \quad (20)$$

Це добре узгоджується з виразом (10), отриманим в результаті чисельного аналізу.

ПОКАЗНИКИ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗСІЯННЯ ТА ПОГЛИНАННЯ

Вираз (14) для коефіцієнта b_0 також входить в формули для коефіцієнтів ефективності розсіювання Q_{sca} і поглинання Q_{abs} . Підставляючи його в формули (2) і (4), отримуємо:

$$Q_{sca}^E = \frac{2}{\rho} \frac{1}{\left(1 + \frac{2}{\pi n^2 \rho^2}\right)^2 + \left(\frac{2 \ln \rho}{\pi}\right)^2},$$

$$Q_{abs}^E = \frac{2}{\rho} \frac{\frac{2}{\pi n^2 \rho^2}}{\left(1 + \frac{2}{\pi n^2 \rho^2}\right)^2 + \left(\frac{2 \ln \rho}{\pi}\right)^2}.$$

На Рис. 6 тонкими лініями показані результати розрахунків ККД Q , Q_{sca} , Q_{abs} по наближених формулах для значень ρ в області максимумів. Вони добре збігаються з результатами розрахунків за точними формулами (жирні лінії).

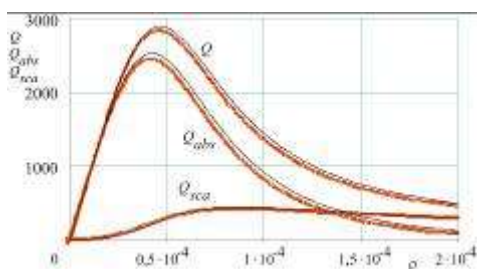


Рис. 6. Коефіцієнти ефективності затухання, розсіювання та поглинання. Товсті лінії - строгий розрахунок, тонкі лінії - приблизні формули.

ЕЛЕКТРОМАГНІТНЕ ПОЛЕ ВСЕРЕДИНІ ЦИЛІНДРА

Розглянемо розподіл електричного поля всередині і навколо циліндра, коли електромагнітна хвиля падає перпендикулярно осі циліндра.

Рефракційний циліндр

Нехай електромагнітне випромінювання з довжиною хвилі $\lambda = 0,01$ м у вільному просторі падає на циліндр з показником заломлення $n = 1,5$. Довжина хвилі всередині циліндра буде $\lambda_i = \lambda/n = 0,00667$ м. На Рис. 7 показано розподіл напруженості електричного поля в циліндрі і його околицях для діаметра $D = \lambda_i / 2$. Це точка резонансу. Випромінювання падає на циліндр зліва. Циліндр фокусує випромінювання, і на виході з циліндра виникає область високої напруженості поля.

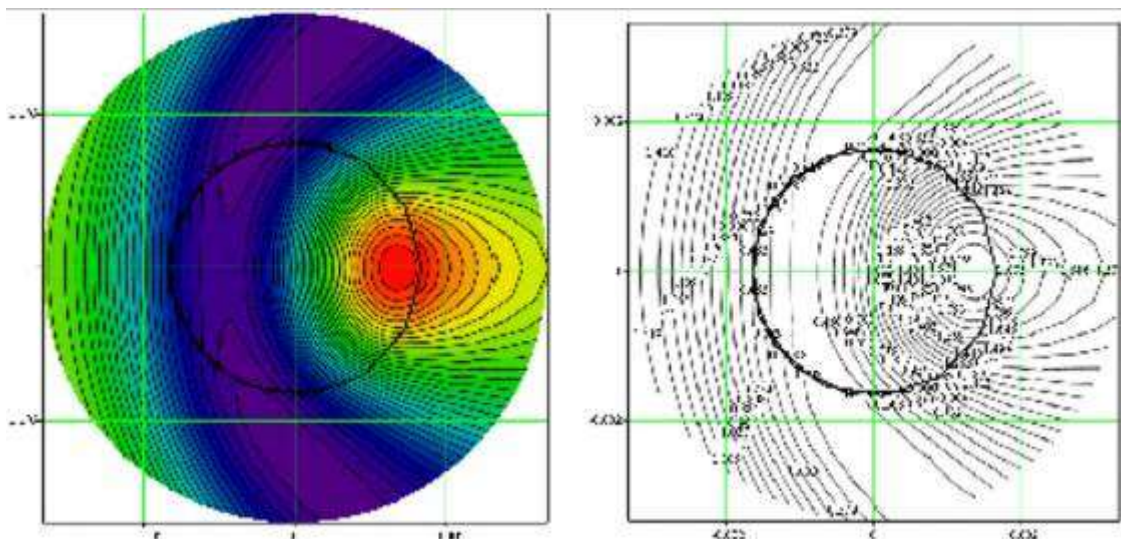


Рис. 7. Розподіл поля в заломлюючому циліндрі з $D = \lambda_i / 2$

На Рис. 8 показано розподіл напруженості електричного поля в циліндрі з $D = \lambda_i / 10$. Тут він практично постійний по всьому перетину циліндра.

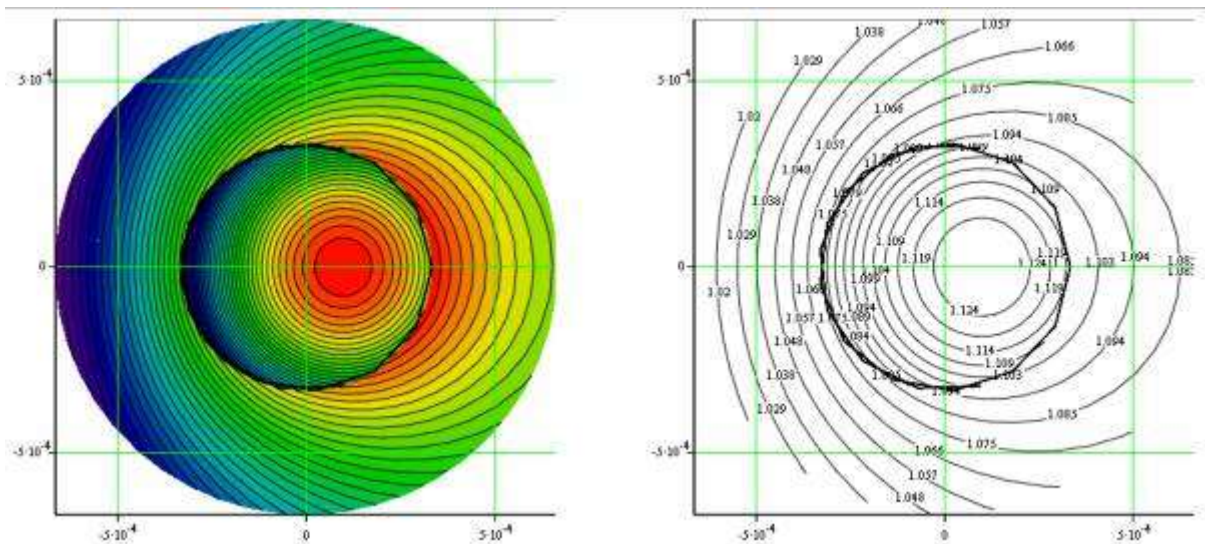


Рис. 8. Розподіл поля в заломлюючому циліндрі з $D = \lambda_i / 10$

Циліндр, що поглинає

Якщо циліндр поглинає падаюче випромінювання, картина дифракції істотно змінюється. Напруженість поля всередині циліндра зменшується, і за циліндром утворюється область тіні (Рис. 8).

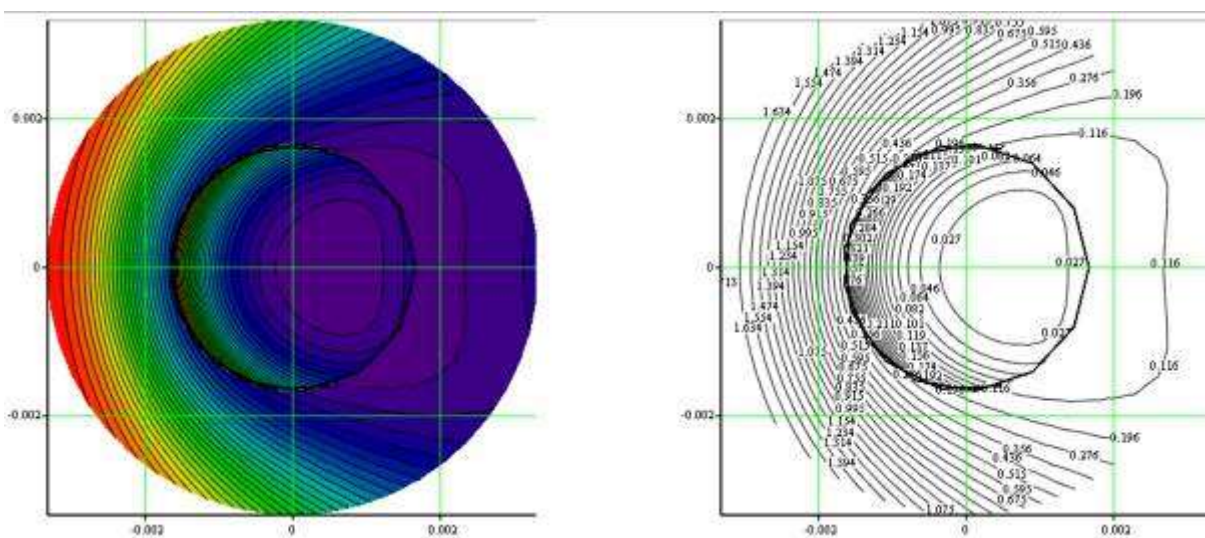


Рис. 9. Розподіл поля в поглинаючому циліндрі з $D = \lambda_i / 2$ ($n = 1,5$, $k = 2$)

Дуже тонкий металевий дріт

Коли діаметр металевого циліндра (дроту) можна порівняти з товщиною скін-шару, напруженість електричного поля всередині нього мало відрізняється від напруженості поля зовні.

Товщина скін-шару в металі δ визначається за відомою формулою

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\omega\sigma}},$$

де μ - магнітна проникність середовища, ω - кругова частота випромінювання, σ - питома провідність середовища. Для платини на частоті 30 ГГц ($\lambda = 0,01$ м) $\delta = 0,94$ мкм.

Максимальна ефективність поглинання платинового дроту для довжини хвилі випромінювання $\lambda = 0,01$ м досягається при діаметрі $D = 0,45$ мкм, що в два рази менше товщини скін-шару. Розподіл напруженості електричного поля всередині і навколо дроту показано на Рис. 9. З рисунка випливає, що напруженість поля практично однакова як всередині циліндра, так і поблизу нього, і вона набагато

менше напруженості поля. в падаючій хвилі, яка приймається рівною одиниці. Цей факт вказує на те, що взаємодія випромінювання з дротом дуже сильна, незважаючи на його невеликий діаметр.

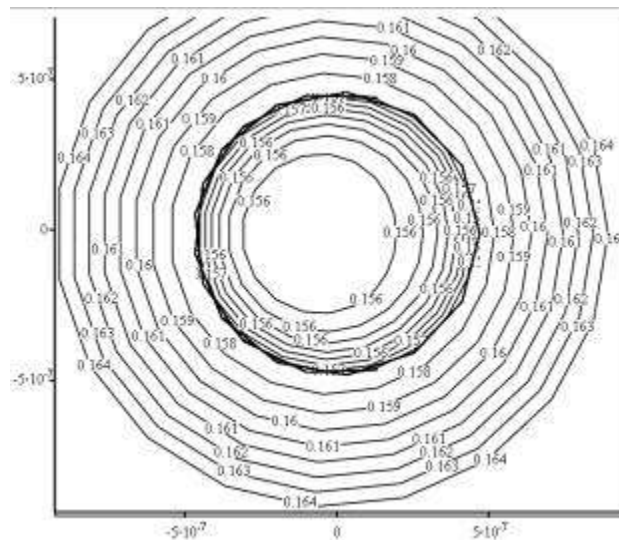


Рис. 9. Розподіл електричного поля в тонкому металевому дроті ($D = 0,94$ мкм, $\lambda = 0,01$ м)

Оцінимо енергію, що поглинається дротом діаметром D і довжиною L . Густина енергії в дроті визначається законом Джоуля-Ленца в диференціальній формі $w = \sigma |E_0|^2 = \sigma I_E$. Загальна енергія, поглинена проводом за 1 с, є

$$W_{abs} = \sigma I_E(D) \frac{\pi D^2}{4} L .$$

Енергія, що падає на відрізок дроту діаметром D і довжиною L за 1 с, є

$$W = I_0 D L ,$$

де I_0 - інтенсивність падаючого випромінювання:

$$I_0 = |E_0|^2 \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} .$$

Відношення енергії W_{abs} , поглиненої проводом, до енергії W , падаючої на геометричну площу освітлюваної частини дроту, є фактором ефективності поглинання:

$$Q_{abs} = \frac{\pi \sigma I_E(D) D}{4 I_0} .$$

Енергія W_{abs} зменшується зі збільшенням діаметра через наявність скін-ефекту і ослаблення проникнення випромінювання в метал. Енергія W , падаюча на геометричну площу освітлюваної частини дроту, збільшується за рахунок збільшення її діаметра. Отже, існує оптимальний діаметр дроту, який відповідає максимальному відношенню цих енергій. Залежність $W_{abs}(D)$ від діаметра дроту показана на Рис.10 суцільною лінією. Цей графік повністю збігається з графіком залежності коефіцієнта ефективності поглинання від діаметра дроту, розрахованого за формулами (4) - (6), що показано на Рис. 11 квадратними маркерами.

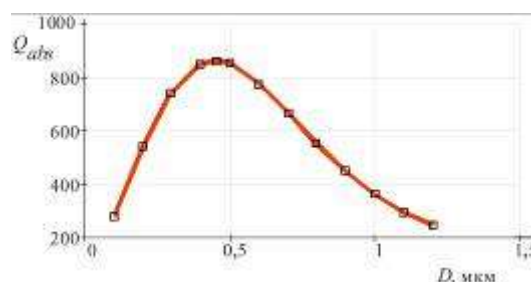


Рис. 10. Залежність коефіцієнта ефективності поглинання дроту від його діаметра

Якісний ефект можна пояснити так. Він відбувається, коли діаметр волокна менше або порівнянний з товщиною скін-шару. Тоді поле заповнює весь поперечний переріз волокна, і середнє значення напруженості електричного поля максимально можливе. Густина енергії електричного поля і потужність поглиненого випромінювання P_{abs} великі. Вона пропорційна об'єму волокна, тобто квадрату його діаметра. Потужність випромінювання P , що потрапляє на волокно, пропорційна діаметру. У міру збільшення діаметра коефіцієнт ефективності поглинання збільшується. Але коли діаметр волокна стає більше, ніж товщина скін-шару, середнє значення напруженості електричного поля зменшується зі збільшенням діаметра. Споживана потужність і коефіцієнт ефективності поглинання знижуються. Цим пояснюється наявність пологого максимуму на графіку залежності коефіцієнта ефективності поглинання від діаметра волокна. Таким чином, цей ефект не є резонансним.


ВИСНОВКИ


1. Якісний і кількісний аналіз ефекту аномально сильного ослаблення, поглинання і розсіяння електромагнітного випромінювання дуже тонкими металевими дротами доводить, що природа цього явища пояснюється існуванням скін-ефекту при взаємодії мікрохвильового випромінювання з матеріалами, які проводять.
2. Ефект аномального поглинання спостерігається в тому випадку, коли діаметр дроту одного порядку з товщиною скін-шару.
3. Максимум поглинання має місце, коли діаметр дроту приблизно на порядок менше довжини хвилі падаючого випромінювання. Для більшості металів в цьому випадку товщина скін-шару вдвічі більше діаметра дроту.
4. Спостережуваний ефект сильного поглинання має нерезонансний характер.


КОНФЛІКТ ІНТЕРЕСІВ

Автори повідомляють про відсутність конфлікту інтересів.

Authors' ORCID ID

Кокодій М.Г.  <https://orcid.org/0000-0003-1325-4563>

Маслов В.О.  <https://orcid.org/0000-0001-7743-7006>

Мунтян К.І.  <https://orcid.org/0000-0001-6479-3511>

REFERENCES

- 1 Hulst van de HC. Light Scattering by Small Particles. New York, USA: Dover Publications, 1981.
- 2 Kerker M. The Scattering of Light and Other Electromagnetic Radiation. New York-San Francisco-London, USA: Academic Press, 2016.
- 3 Lazarev LP, Mirovitskaya SD. Control of the Geometric and Optical Parameters of Fibres, Moscow, USSR: Radio and Svyaz', 1988. [in Russian].
- 4 Irvine WM. Light scattering by spherical particles: radiation pressure, asymmetry factor, and extinction cross section. J. Opt. Soc. Am. Jan 1965;55(1):16-21. doi 10.1364/JOSA.55.000016
- 5 Kokodii NG. Nature of resonances in a thick refracting cylinder during of an electromagnetic wave. Opt. Spectrosc. 1992;72(2):249-251.
- 6 Kotlyar VV, Kozlov DA, Kovalev AA. Calculation of the resonant radius of a dielectric cylinder illuminated by a plane TE-wave. Comput. Opt. 2015;39(2):163-171.
- 7 Kozlov DA. Whispering gallery modes in a dielectric cylinder with circular cross-section. Comput. Opt. 2017;41(3):377-384.
- 8 Kuzmichev VM, Kokodii NG, Safronov BV, Balkashin VP. Values of the absorption efficiency factor of a thin metal cylinder in the microwave band. J. Commun. Technol. Electron. 2003;48(11):1240-1242.
- 9 Kokodii NG. Microwave radiation absorption in an ultrathin doublelayer cylinder. J. Commun. Technol. Electron. 2006;51(2):175-178.
- 10 Shevchenko VV. On the absorption of an electromagnetic wave by a thin wire. Radiotekh. Elektron. (Moscow). 1991;36(12):2400-2403.
- 11 Akhmeteli AM. Efficient heating of thin cylindrical targets by broad electromagnetic beams I. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/physics/0405091.pdf>. Accessed on: Apr 10, 2020.
- 12 Akhmeteli AM. Efficient heating of thin cylindrical targets by broad electromagnetic beams II. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/physics/0611169.pdf>. Accessed on: Apr 10, 2020.
- 13 Odarenko EN, Switch VA, Shmatko AA. Scattering of a wave beam by a thin dielectric cylinder with losses. Proc. 17th Int. Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology, Sevastopol; 2007. p. 934-935.